

Teil 1: Rapid Prototyping-Design und Umsetzung für die MicroMagic und RG65

Anhänge für Segelboote aus dem 3D-Drucker

Mindestens genauso wichtig wie die Segel über Wasser, sind bei einem Segelboot die Anhänge unter Wasser, also Kiel und Ruder. Sie entscheiden maßgeblich über die Fähigkeit, Höhe zu laufen („Gegen den Wind zu fahren“) und über die Manövrierfähigkeit. Die nähere Beschäftigung mit diesem Thema wurde ausgelöst durch den Wunsch nach einem besseren Ruderblatt für die MicroMagic des Autors, sowie durch negative Erfahrungen mit einigen Ruderblättern für die RG65-Klasse. In dem hier vorliegenden ersten Teil berichtet der Autor über das Rapid Prototyping von Ruderblättern für die RG65 und die MicroMagic. In einem weiteren Beitrag wird er die Ergebnisse von Praxistests mit verschiedenen Ruderblattformen vorstellen.

Motivation

In der Vergangenheit habe ich Ruderblätter für meine Segelboote meist fertig gekauft oder selbst aus dem Vollen geschneit. Die Herstellung einer eigenen Form, um Ruderblätter zu laminieren, scheiterte am fehlenden Zugang zu einer CNC-Fräse, denn die handgeschneitenden Blätter waren nicht präzise genug, als dass sich ein Abformen gelohnt hätte. Den Umriss eines Ruderblatts bekommt man ja noch einigermaßen reproduzierbar hin, aber bei Profildicken von nur wenigen Millimetern ist das präzise Herausschleifen eines Profils schwierig und aufwändig. Für eine geplante Testreihe mit unterschiedlichen Ruderblättern musste also ein Fertigungsverfahren her, mit dem sich zumindest Prototypen einfach und reproduzierbar herstellen lassen. Üblicherweise werden hochwertige Ruderblätter und Kielflossen in Negativformen laminiert, gern unter Einsatz von Kohlefasern. Das ist für eine schnelle Prototypenfertigung völlig ungeeignet, da die Herstellung eines perfekten Urmodells mit anschließendem Formenbau oder das direkte Bauen einer Negativform in der Regel den Einsatz

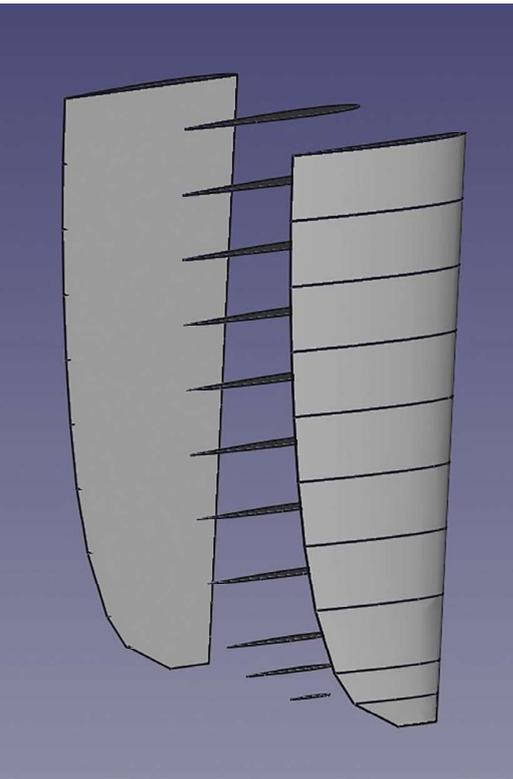


Abb. 5: Die Loftfunktion verbindet die Rippen mit einer homogenen Fläche

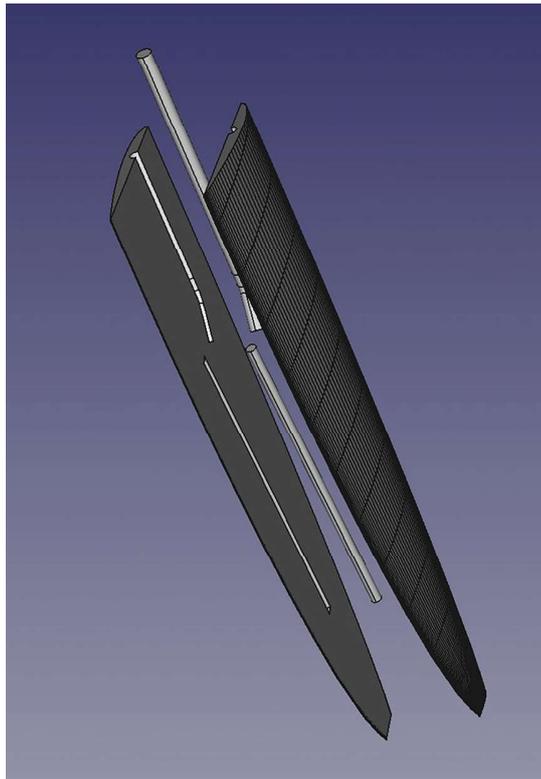


Abb. 6: Das Einbringen von Aussparungen für Ruderwelle und eventuelle Verstärkung ist danach eine leichte Übung

oder FreeCAD für allgemeine Konstruktionsaufgaben sind in Modellbauerkreise wohl bekannt und weit verbreitet. Ich habe mich in den vergangenen Monaten mit leidlichem Erfolg durch die Grundlagen von FreeCAD gequält und nutze dieses Programm inzwischen für fast alle im Modellbau anfallenden Konstruktionsaufgaben. Aus diesem Grund beziehen sich die in diesem Beitrag zum Design gemachten Ausführungen überwiegend auf das Programm FreeCAD, lassen sich

aber natürlich auch auf andere CAD-Programme übertragen. Nicht nur beim praktischen Modellbau, auch beim CAD ist ein schrittweises und strukturiertes Vorgehen sinnvoll. Deshalb ist im ersten Schritt der gewünschte Umriss des Ruderblatts festzulegen. Die mögliche Formenpalette beginnt bei einfachen, eckigen Trapezformen, ermöglicht aber auch widerstandsärmere Formen mit elliptischer Auftriebsverteilung. Weit verbreitet sind heute

Ruderblätter, die grob einer Viertelellipse angenähert sind (Abb. 1). Aber auch andere Umrisse, wie die „straight quarter chord line“, das ist eine verzerrte Ellipsenform, bei der die 25%-Linie der Profiltiefe eine Gerade bildet, sind möglich.

Neben dem Umriss wird ein strömungsgünstiges Profil benötigt. Ruder eines Segelboots werden gern einmal etwas härter und schneller gelegt, was leicht einen frühzeitigen Strömungsabriss und damit einen weitgehenden Verlust der Steuerwirkung provozieren kann. Es wird also ein Profil benötigt, bei dem im Falle des Überziehens, die Strömung erst sehr spät abreißt. Die Strömungsverhältnisse rund um unsere Modellboote sind bisher zwar wenig erforscht, für eine Profilauswahl wird man mit einer Orientierung an den Großbooten nicht viel falsch machen. Deshalb fiel für Ruderblätter die Wahl auf ein als gutmütig geltendes NACA-Profil mit der Kennnummer 0012, d.h. ein symmetrisches Profil mit 12% Profildicke.

Kiefllossen arbeiten in der Regel bei kleineren Anstellwinkeln, was den Einsatz etwas schlankerer Profile ermöglicht. Für sie kommt daher das NACA 0007 zum Einsatz (Abb. 2). FreeCAD kann die Daten für diese Profile auf Knopfdruck bereitstellen und stellt sie als z.B. 100 mm lange Musterrippe zur Verfügung. Es gibt aber auch andere Profildatensätze im Netz, mit denen man sich die gewünschte Profilkontur erzeugen und in die CAD-Software importieren kann.

Nun zum Vorgehen

Zunächst werden der Umriss des Ruderblatts und die Lage der benötigten Profilquerschnitte festgelegt (Abb. 3). Aus dem Umriss des Ruderblatts lassen sich die genauen Längen an der Position der Profile bestimmen. Das ist ein Schritt, der in FreeCAD etwas mühsam ist, da man hierbei an die Grenzen des Programms beim Umgang mit B-Splines stößt. Hoffen wir, dass diese Schwachstellen in den nächsten Versionen von FreeCAD sukzessive ausgeräumt werden.

An den festgelegten Positionen werden die Profilquerschnitte als Spanten eingefügt und sauber positioniert (Abb. 4). Die jeweilige Profilform erzeugt man durch Skalieren der Musterrippe. Mit

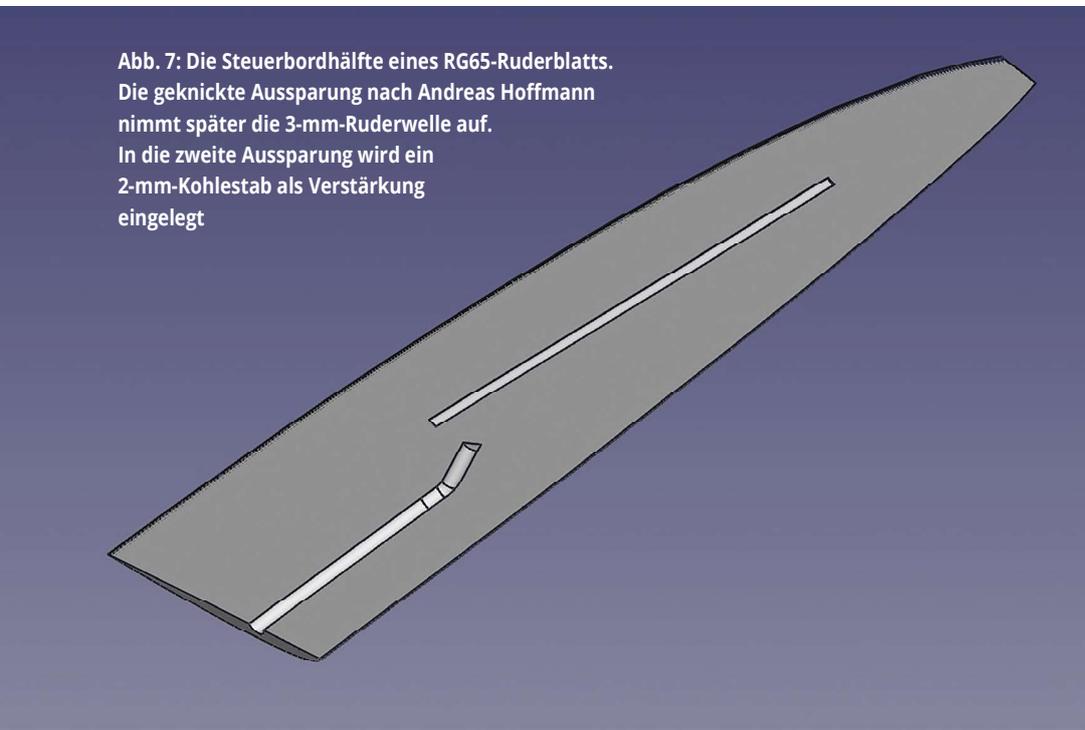


Abb. 7: Die Steuerbordhälfte eines RG65-Ruderblatts. Die geknickte Aussparung nach Andreas Hoffmann nimmt später die 3-mm-Ruderwelle auf. In die zweite Aussparung wird ein 2-mm-Kohlestab als Verstärkung eingelegt

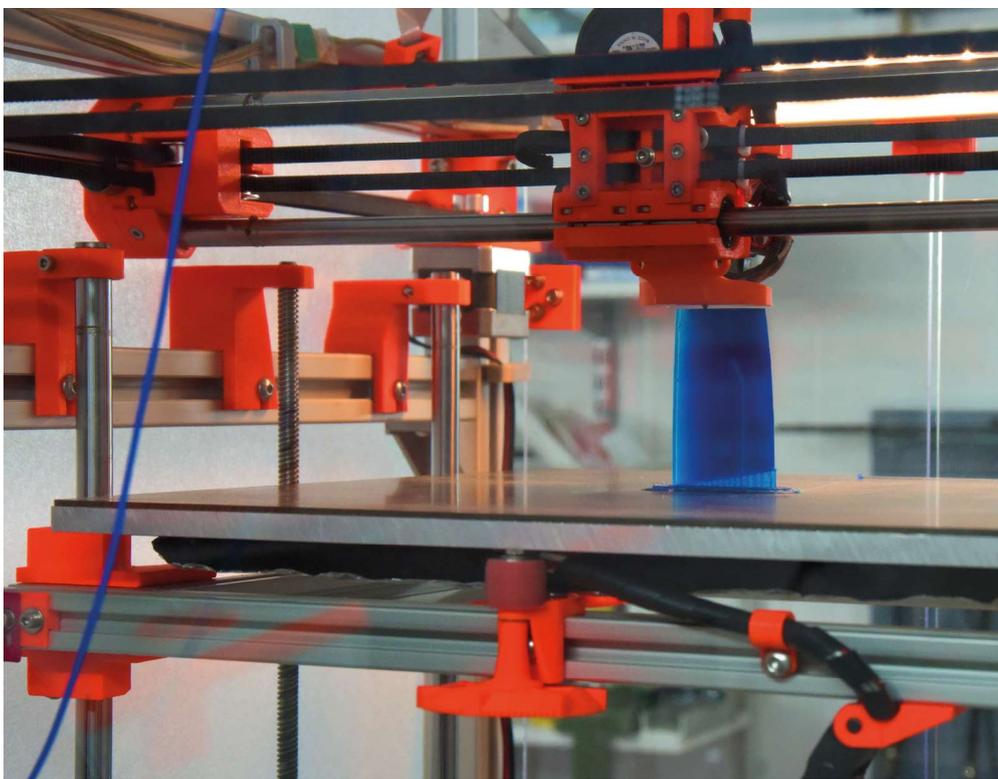


Abb. 8a: Das Bild zeigt ein Ruder während des Druckvorganges in einem HEVO. Für eine bessere Druckbetthaftung wurden Brim und Raft benutzt.
Abb. 8b: Um die Schräge zur Anpassung an die Rumpfkontur mitdrucken zu können, steht der hintere Teil des Ruderblattes auf Supportstrukturen



Abb. 9: Ein RG-Ruder im liegenden Druck. Die Steuerbordseite lässt die einzelnen Schichten gut erkennen. Gedruckt wurde hier mit einer Layerhöhe von 0,1 mm. Auf der Innenseite der Backbordhälfte sieht man die Aussparungen für Ruderwelle und Verstärkung



Abb. 10a: Nach dem Verschleifen wird das Ruderblatt beidseitig mit Epoxidharz und einem 25-g/m²-Glasgewebe belegt. Das glättet die letzten Stufen und macht die scharf auslaufende Hinterkante stabil

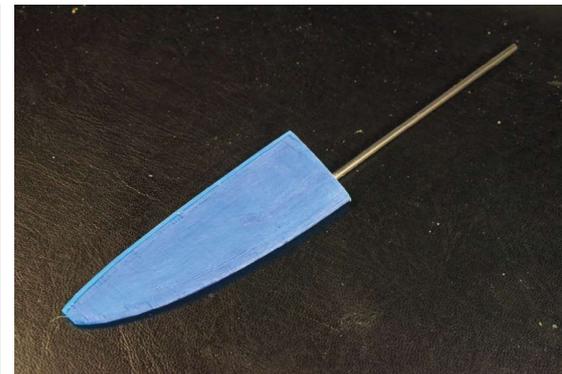


Abb. 10b: Beim stehend gedruckten Ruderblatt sind die Spuren des Drucks schon nach kurzem Überschleifen verschwunden. Wenn man mit einer etwas runderen Hinterkante leben kann, kann sofort lackiert werden

der Loftfunktion werden sie anschließend zu einer glatten Oberfläche zusammengeführt (Abb. 5). Es ist dabei – zumindest soweit es FreeCAD betrifft – sinnvoll, bei den Spantkonturen auf B-Splines zu verzichten. Das Handling der Polylinien in FreeCAD ist erheblich schneller und zuverlässiger und die Ergebnisse sind sauberer. Eine Polylinie mit 50 Segmenten ist dabei mehr als ausreichend, um eine glatte Oberfläche zu erzeugen. Es empfiehlt sich auch, nicht mit Vollspanten zu arbeiten, sondern sich von vornherein auf Halbspanten zu fokussieren. Die zweite Hälfte lässt sich einfach durch Spiegeln generieren.

Wenn das Innenleben im CAD dann schon so einfach offenliegt, lassen sich auch gleich die notwendigen Ausspa-

rungen für die Ruderwelle und eventuelle Verstärkungen im Blatt unterbringen (Abb. 6). Das erspart das lästige nachträgliche Ausbohren bzw. Ausfräsen des Blattes und erlaubt eine formschlüssige Verbindung mit der Ruderwelle.

Die CAD-Daten lassen sich nun leider nicht unmittelbar weiterverarbeiten. Es ist noch ein Zwischenschritt erforderlich, der aus den CAD-Daten maschinenlesbare Kommandos macht. Dazu wird das Ruderblatt zunächst im sog. STL-Format abgespeichert. Das ist ein Datenformat, das ursprünglich aus der Stereolithografie kommt (daher Stl) und sich in der 3D-Drucktechnologie als Standardübergabeformat eingebürgert hat. Diese STL-Dateien werden vom sogenannten Slicer für den jeweiligen Drucker und das verwendete Filament

aufbereitet. Dieser Schritt ist notwendig, weil jeder Drucker und jedes Filament andere Einstellungen erfordert. Der Slicer berechnet aus den STL-Daten den GCODE, das sind die Einzelbefehle für den Drucker, die die Bewegungen des Druckkopfes, den Materialfluss sowie die Temperaturen von Druckkopf und Heizbett steuern.

Wir drucken

Mit dem Exportieren der STL-Dateien sind die CAD-Vorbereitungen für die Herstellung des Ruderblattes zwar erst einmal abgeschlossen, für das Erzeugen des GCODEs müssen aber die Eigenschaften von Drucker und Filament bekannt sein. Es steht also noch die Materialauswahl an.



Abb. 11: Eine Kielflossenhälfte für die MM. Gut zu erkennen sind die durch die einzelnen Schichten hervorgerufenen Stufen in der Oberfläche, obwohl diese nur 0,1 mm dick sind



Abb. 12: Der erste gedruckte MM-Kiel kurz vor der Fertigstellung. Gedruckt wurde der Kiel liegend in zwei Hälften mit Greentec-Carbon und anschließend mit einer Polyesterbeschichtung mit 25-g/m²-Glasgewebe versehen. Am Blei ist noch etwas Spachtelarbeit zu leisten, danach kann lackiert werden

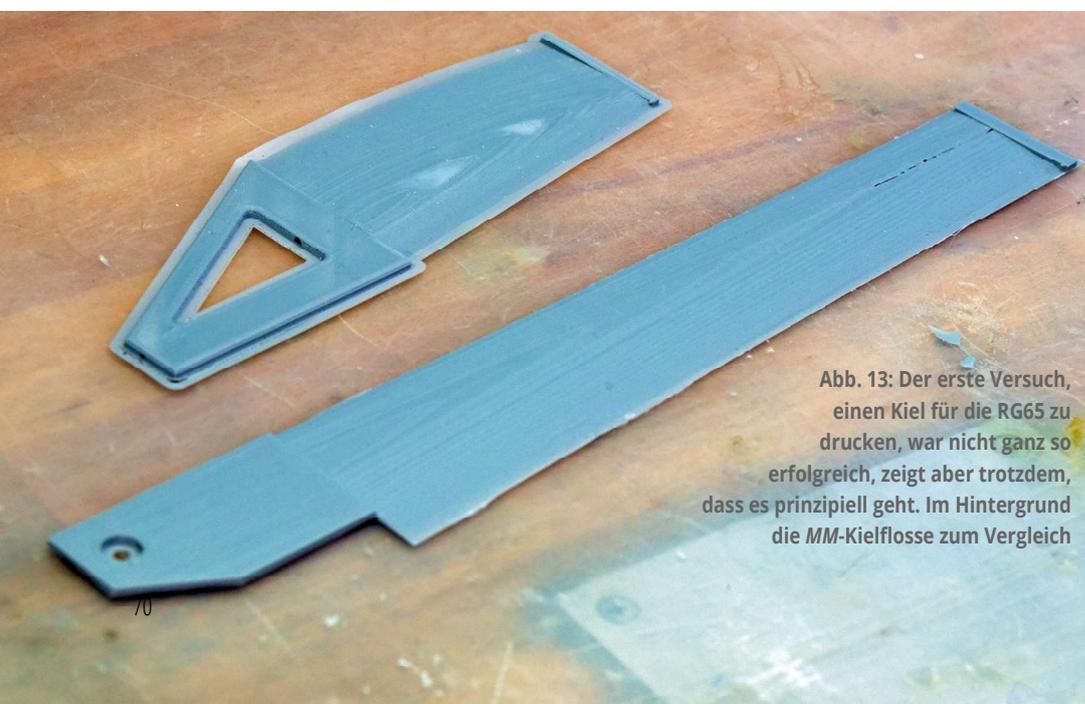


Abb. 13: Der erste Versuch, einen Kiel für die RG65 zu drucken, war nicht ganz so erfolgreich, zeigt aber trotzdem, dass es prinzipiell geht. Im Hintergrund die MM-Kielflosse zum Vergleich

Erste Versuche mit dem einfach zu druckenden PLA brachten zwar gute Druckergebnisse, manches PLA erwies sich aber in der Praxis als zu spröde. PLA ist leider nicht gleich PLA. Die recht scharf ausgeformte Hinterkante eines Ruderblattes ist einfach zu empfindlich. Sie brach bei der (notwendigen) Nachbearbeitung gern aus. Der zweite Anlauf erfolgte mit PETG. PETG ist etwas temperaturstabiler als PLA, erheblich elastischer und insgesamt weicher, so dass die Nacharbeit um einiges leichter wurde. PLA+, eine Weiterentwicklung des normalen PLAs, ist ein weiterer, heißer Kandidat, verträgt aber genauso wenig Temperatur wie normales PLA. ASA ist m.E. derzeit für viele Anwendungen das Material der Wahl. Es hat ähnliche Eigenschaften wie ABS und ist gut klebbar. Gute Ergebnisse versprechen auch Carbon-gefüllte Filamente. Diese sind interessant, wenn man die hier vorgestellte Methode auf Kielflossen übertragen will. Aber zuvor ist noch eine weitere, grundlegende Frage zu klären, die Druckrichtung. Bei den ersten Ruderblättern übernahm ich das Vorgehen von Andreas Hoffmann, der seine Ruderblätter in zwei Hälften druckt. Man hat bei diesem Verfahren eine große Auflagefläche auf dem Druckbett und man kann das Innenleben aufwändig gestalten. So druckt Andreas seine Ruderblätter immer mit einer geknickten Bohrung, um eine formschlüssige Verbindung mit der Ruderwelle zu ermöglichen. Und er sieht gern eine eingelegte Verstärkung aus Kohlefaser für die Fläche vor (Abb. 7).

Eine Alternative ist das aufrechtstehende Drucken (Abb. 8). Das ist wegen der kleinen Grundfläche, mit der das Blatt auf dem Druckbett steht, etwas kritisch – besonders bei Druckern der „Heizbettschubser-Klasse“. Bei denen bewegt sich das ganze Heizbett während des Druckens hin und her, so dass lange, schlanke Bauteile, die aufrecht gedruckt werden, schnell ins Schwingen geraten können.

Vorteil des aufrechten Druckens ist die glattere Oberfläche und der Wegfall des nachträglichen Verklebens der beiden Hälften. Dafür ist es schwieriger, eine maßhaltige Bohrung für die Welle und eine formschlüssige Aufnahme für die Ruderwelle zu erzeugen. Außerdem lässt sich die Blatthinterkante nicht so scharf ausformen wie beim liegenden Druck.

Bei letzterem erhält man eine gestufte Oberfläche, da die einzelnen Schichten nicht stufenlos auslaufend gedruckt werden können. Außerdem ist das nachträgliche Verkleben der beiden Blatthälften nötig. Dafür lässt sich der Druck problemlos auf Heizbettschubsern durchführen und die Hinterkante kann bereits beim Druck schärfer ausgeführt werden. Eine eventuell erforderliche Nacharbeit der Bohrung für die Ruderwelle ist bei diesen Verfahren auch leichter durchzuführen.

Beiden Verfahren gemein ist die Größenbeschränkung. Viele übliche 3D-Drucker haben ein nutzbares Bauvolumen von nur etwa 20×20×25 cm. Damit ist die maximale Größe auf etwas über 20 cm limitiert. Das ist ausreichend für ein Ruderblatt für die *MicroMagic* oder die *RG65*. Auch ein IOM-Ruder sollte noch gehen. Mein HEVO hat ein nutzbares Volumen von 28×28×53 cm und erlaubt es, nicht nur Kielflossen für die *MM* sondern auch für die *RG* zu drucken.

Welches Verfahren man wählt, hängt nun ganz von den persönlichen Vorlieben und dem zur Verfügung stehenden Drucker ab. Ich tendiere zum liegenden Druck, auch wenn mein HEVO mit 53 cm Bauraumhöhe für den aufrechtstehenden Druck prädestiniert ist. Ein HEVO (Hypercube Evolution, s. auch MW 01/2021) gehört in die Klasse der CoreXY-Drucker, bei denen das Druckbett nur vertikal verfahren wird. Lange, schlanke Teile können daher nicht so leicht ins Schwingen geraten.

Nach Eingabe der Material- und Druckparameter in den Slicer und erfolgtem Postprocessing der CAD-Daten wird der Druckprozess gestartet und einige Stunden später kann man das Ergebnis vom Druckbett nehmen. Dann ist allerdings etwas Nacharbeit angesagt.

Ohne Nacharbeit geht's nicht!

Aber warum Nacharbeit? Es ist so, dass der 3D-Drucker feine Kunststoffäden auf der Druckunterlage ablegt und miteinander verschmilzt. In der Regel arbeitet man dabei mit Schichtdicken von 1-2 Zehntelmillimetern (Abb. 9). Dadurch wird die Oberfläche nie wirklich glatt. Für unser Ruderblatt bedeutet dies, dass es mit einer möglichst geringen Schichtdicke gedruckt werden muss. 2/10 mm sind für einen liegenden Druck zu grob, 1/10 mm ist brauchbar, 5/100 mm sind besser, denn je feiner die Schichten bei Druck sind, desto geringer ist der Aufwand bei Glattschleifen. Der stehende Druck ist da nicht so anspruchsvoll, hierbei sind 0,2-mm-Layer gerade noch tolerabel. Um das Ruder etwas widerstandsfähiger für den rauen Alltagsbetrieb zu machen, wird es nach dem Schleifen mit einer dünnen Glaslage (25 g/m²) überzogen. Dies glättet die letzten Reste der Layerstufen und eine nachfolgende Lackierung sorgt für die gewünschte Optik (Abb. 10).

Vorher muss das Blatt, sofern liegend gedruckt, noch verklebt werden. Sekundenkleber geht fast immer (Obacht, die langsamen sog. 30-Sek-Kleber kleben in der Regel unsere Materialien nicht!), UHU allplast spezial geht bei vielen Filament-Kunststoffen, aber nicht bei allen. Epoxidharz und Polyester ist für Beschichtungen und Spachtelarbeiten meist geeignet, sollte aber nicht zu spröde aushärten. Dachrinnenkleber bzw. Kleber für PVC können manchmal das Klebproblem lösen, und Ethylazetat (ein Lösemittel) hilft bei PETG.

Nach sorgfältigem Verschleifen der Layerstufen wird eine dünne Glasgewebe-lage mit Epoxid- oder Polyesterharz aufgebracht. Es empfiehlt sich, an einem Probestück zu testen, welches Harz auf dem jeweiligen Filament besser haftet. Danach erfolgt ein nochmaliges Schleifen. Eventuell müssen die letzten Schritte zwei- oder dreimal durchgeführt werden, um eine gute Oberfläche zu erzie-

len. Nach einer abschließenden Lackierung ist das gute Stück einsatzbereit.

Und was ist mit den Kielen?

Inzwischen habe ich auch versucht, das beschriebene Vorgehen auf Kielflossen zu übertragen. Ein Druck sollte dabei liegend durchgeführt werden, denn es müssen die Aufnahmen für die Befestigungsbolzen und ein Edelstahl-draht als „Rückgrat“ in der Flosse untergebracht werden. Ein Gewindebolzen (oben) fixiert beim Segeln die Kielflosse im Rumpf, ein 3-mm-Edelstahldraht verstärkt die Flosse und verhindert effektiv ein zu starkes Verbiegen im rauen Fahrbetrieb (Abb. 11 bis 13).

Für die *MM* ist das kein Problem. Der *MM*-Kiel ist recht kurz. Die größte Schwierigkeit bestand darin, den Winkel des Kielkopfes exakt zu treffen. Gedruckt mit Greentech-Carbon und nach dem Schleifen mit 25-g/m²-Glasglasgewebe überzogen, ist die Kielflosse ähnlich stabil wie das Original.

Ein *RG65*-Kiel ist bedeutend länger und im unteren Bereich schmaler. Die ersten Druckversuche haben gezeigt, dass das NACA 0007-Profil hierfür bereits zu dünn ist. Beim genauen Hinsehen erkennt man in Abb.13, dass die Oberseite der Flosse auf den unteren ca. 5 cm entlang der Aussparung für den Stahldraht aufgerissen ist. Das erfordert ein neues Design. In Vorbereitung ist ein Versuch mit einem NACA 0007 Profil oben und einem NACA0009 Profil am schmalen Ende. Der erste Versuch zeigt aber, dass auch das Drucken von längeren Kielflossen prinzipiell möglich ist, wenn das Druckbett des Druckers ausreichend groß ist.

Fazit und Ausblick

Der 3D-Druck hat sich als eine gute Möglichkeit für das Rapid Prototyping von Ruderblättern etabliert. Für Ruderblätter bis hinauf zur *IOM*-Größe sollte das beschriebene Vorgehen geeignet sein. Bei mir sind nach diesem Vorbild inzwischen mehrere Rudergarnituren für die *RG65* entstanden. Auch meine *MicroMagic* ist bereits umgerüstet und wartet auf die ersten Probeschläge (Abb. 14). Der Sommer steht vor der Tür und bringt eine Lockerung der Corona-Auflagen mit sich. Dann kann



Abb. 14: Ein neues Ruderblatt für die *MM* wartet auf den Praxistest. Das Blatt ist in zwei Hälften liegend aus ASA gedruckt

Exkurs: CAD-Software für Ruder und Kielflossen

Die Konstruktion eines Ruderblatts oder einer Kielflosse ist vergleichbar mit der Konstruktion von Tragflächen im Flugmodellbau. Bei den Flugmodellbauern findet man daher auch die entsprechenden Hinweise, wie man so eine Aufgabe angehen kann. Es geht letztendlich darum, über eine Reihe von Querschnittsprofilen eine möglichst glatte Hüllfläche zu legen. Dies geschieht idealerweise auf der Basis von B-Splines. Das ist eine Klasse von mathematischen Kurven, die die Beschreibung beliebig gekrümmter Linien und Flächen im Raum ermöglichen. DELFTship und FREEship stellen einen Keel & Rudder Wizard, also einen Assistenten zur Konstruktion von Kielflossen und Ruderblättern zur Verfügung. FreeCAD und Fusion360 bietet alle notwendigen Funktionalitäten an, wie sie zur Konstruktion z.B. von Tragflächen benötigt werden. Der Wizard von DELFTship ist in seinen Freiheiten limitiert, dafür aber einfach zu bedienen. FreeCAD dagegen bietet (fast) alle Freiheiten, ist in seiner Benutzeroberfläche aber wenig intuitiv und daher nur mit ausreichender Übung gut zu bedienen. Fusion360 ist in der Benutzeroberfläche erheblich weiterentwickelt. Hier deutet sich aber an, dass der Hersteller Autodesk zukünftig von der bislang für den Hobbynutzer großzügigen Lizenzpolitik abrückt.

endlich die Testreihe mit unterschiedlichen Ruderblattformen beginnen. Die Ergebnisse werden der Inhalt eines Folgeartikels sein.